

## Tafel 6.6 Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert

### Einleitung

Der Wasserhaushalt eines hydrologischen Einzugsgebietes wird durch das regionale Klima geprägt. Zusätzlich beeinflussen auch die Landoberflächenbedeckung, die Landnutzung sowie verschiedene anthropogene wasserwirtschaftliche Eingriffe den Wasserhaushalt. Beispiele dafür sind grossflächige Bewässerung, Wasserrückhalt in Speichern oder Seeregulierungen. Entsprechend widerspiegeln sich Veränderungen des Klimas oder der Landnutzung im Wasserhaushalt: Mit der schon seit Mitte des 19. Jahrhunderts beobachteten Klimaveränderung steigt die Lufttemperatur, was das Abschmelzen der Gletscher fördert und die Verdunstung erhöht. Auch das Niederschlagsgeschehen kann sich verändern. Landnutzungsänderungen wie z.B. die Intensivierung der Landwirtschaft oder die Zunahme der Waldflächen lassen die Verdunstung zusätzlich ansteigen. Lange Zeitreihen der Wasserhaushaltselemente zeigen also einerseits, welche Wasserressourcen in einem Einzugsgebiet zur Verfügung stehen und andererseits, wie sich der Wasserhaushalt aufgrund der erwähnten Einflussgrössen allenfalls verändert hat. Die vereinfachte Wasserhaushaltsgleichung, gültig für ein abgeschlossenes Einzugsgebiet ohne künstliche Überleitungen und ohne unter- oder oberirdische Zu- und Abflüsse, legt die Zusammenhänge klar dar:

$$P - R - E - \delta S = 0$$

mit P Niederschlag, R Abfluss, E Evapotranspiration (Verdunstung) und  $\delta S$  Speicheränderungen (z.B. Gletscher, Schneedecke, Seen, künstliche Speicher, Grundwasser). Über längere Zeiträume betrachtet, können die Speicheränderungen mit Ausnahme der Gletscher vernachlässigt werden. Deshalb konnte für die vorliegende Tafel die Verdunstung als Restglied aus der Wasserbilanzgleichung berechnet werden.

### Daten und Methodik

Die vorliegende Tafel ist eine Aktualisierung und Ergänzung der Tafel 6.1, welche nur Daten bis 1980 enthält. Gerade der Zeitraum nach 1980 zeichnet sich aber durch eine starke Zunahme der Temperatur und ein entsprechendes Abschmelzen der Gletscher aus. In der neuen Tafel werden nun die einzelnen Wasserhaushaltskomponenten grosser Einzugsgebiete für das gesamte 20. Jahrhundert dargestellt.

Der Abfluss der untersuchten grossen Flussgebiete basiert weitgehend auf Messdaten von eidgenössischen Abflussmessstationen (s. Tafel 5.1<sup>2</sup>). Gegenüber der Tafel 6.1 wurden neu auch die Wasserbilanzen zweier Aare-Teileinzugsgebiete Bern bis Brugg und Brugg bis Brugg berechnet und dargestellt. Die Daten der beiden Aare-Teileinzugsgebiete Aare–Bern (Messreihe erst ab 1917) und Aare–Brugg (Messreihe erst ab 1904) wurden teilweise mithilfe von Regressionsmodellen rekonstruiert. Die Aare-Zwischeneinzugsgebiete Bern bis Brugg und Brugg bis Brugg konnten anschliessend flächengewichtet berechnet werden.

Die «alten» Niederschlagsdaten 1901–1980 aus der Tafel 6.1 wurden an «neue» Niederschlagsdaten 1961–2007 [3] angepasst und zu einem homogenen Datensatz 1901–2007 verknüpft. Anschliessend wurde die gesamte Messreihe mit den Niederschlagsdaten aus Tafel 6.3 normiert [7]. Damit ist auch sichergestellt, dass die Resultate mit den Inhalten der Tafeln 4.1 (Verdunstung) sowie 2.6 und 2.7 (Niederschlag) kohärent sind. Die «neuen» Niederschlagsdaten resultieren aus einer hochaufgelösten Interpolation (Gitter von 2 km • 2 km) von Pluviometerstationsdaten mithilfe des PRISM Climate Mapping Verfahrens (s. Tafeln 2.6, 2.7 und [1]).

Zur Gletschervolumenbestimmung sind wesentliche neue wissenschaftliche Arbeiten erschienen [2,4]. Deshalb wurden für die vorliegende Tafel auch die Gletscherreservenänderungen in den einzelnen Einzugsgebieten für 1901–2007 mittels einer neuen Methodik neu berechnet, wobei von jährlichen Massenbilanzdaten des Aletschgletschers ausgegangen wurde [4]. Für die Erfassung

der Gletscherflächenentwicklung in den jeweiligen Einzugsgebieten im 20. Jahrhundert wurden Referenzwerte für 1901, 1930 und 1973 aus dem Gletscherinventar 1973 [5] sowie für 2007 aus dem digitalen Landschaftsmodell der Schweiz «VECTOR25» des Bundesamtes für Landestopografie berechnet. Zwischen den einzelnen Referenzwerten wurde interpoliert. Die Verwendung von Massenbilanzdaten des Aletschgletschers zur Bestimmung der jährlichen Entwicklung im Gletschervolumen in allen untersuchten grossen Einzugsgebieten basiert auf der stark vereinfachenden Annahme, dass die relative Volumenentwicklung des Aletschgletschers für Gletscher in der gesamten Schweiz repräsentativ ist.

Die Daten der Speicheränderungen der natürlichen Seen basieren auf Wasserstandsstationen des Bundes. Berücksichtigt wurden dabei nur diejenigen grösseren Seen, die mindestens eine monatliche Schwankung der Gebietsreserve von 1 mm bewirken konnten. Die Reservenänderungen künstlicher Seen sowie Überleitungen wurden in Tafel 6.1 für 1901–1980 monatlich aufbereitet [6]. Für die weiteren Jahre standen mit Ausnahme der Ableitung Spöl (Einzugsgebiet Inn/En–Martina) und der Zuleitung aus der Unteralpreuss zum Ritomsee (Einzugsgebiet Ticino–Bellinzona) keine Messdaten für Überleitungen mehr zur Verfügung. Die fehlenden Daten mussten aus diesem Grund basierend auf den letzten verfügbaren Jahren geschätzt werden.

Die Verdunstung wurde als Restglied aus der Wasserbilanzgleichung berechnet. Dabei weichen die Verdunstungsdaten 1901–1980 in der vorliegenden Tafel teilweise leicht von den Verdunstungsdaten in Tafel 6.1 ab, da wie bereits erwähnt den Daten der Gletscherreservenänderung andere Berechnungsmethoden zugrunde liegen. Im Grossen und Ganzen stimmen die Verdunstungswerte der grossen Einzugsgebiete gut mit den Werten aus Tafel 4.1 überein.

## Analysen

Die Karte der Gebietsniederschläge lässt deutlich die Klimaregionen der Schweiz erkennen: Das Tessin erhält sehr viel und die Gebiete am Alpennordhang noch überdurchschnittlich viel Niederschlag. Umgekehrt erscheinen der nördliche Jura und die Niederungen des Mittellandes sowie das Engadin als inneralpines Trockental als Zonen mit deutlich unterdurchschnittlichem Niederschlag. In der Karte des Gebietsabflusses erscheint ein ähnliches räumliches Verteilungsmuster – allerdings noch akzentuierter, da in den tiefer gelegenen Gebieten des Mittellandes die Verdunstung überdurchschnittlich ist. Weil die Verdunstung bei ausreichendem Niederschlag hauptsächlich durch die Temperatur bestimmt wird, kommt die Höhenlage der Gebiete in der Karte der Gebietsverdunstung deutlich zum Ausdruck. Die langfristigen Vorratsänderungen sind vom Rückgang der Gletscher dominiert; also sind die grössten Veränderungen im Einzugsgebiet der Rhone sichtbar, wo das grösste Gletschervolumen liegt (s. Tab. 1). Für die ganze Schweiz und über das gesamte 20. Jahrhundert gesehen (Fig. 2) verdunstet fast genau ein Drittel der Niederschläge. Entsprechend verlassen zwei Drittel als Abfluss die Schweiz über die grossen Flüsse. Und obwohl die Gletscher in diesen 100 Jahren rund 40 % ihres Volumens eingebüsst haben, tragen sie im Durchschnitt nur etwa 1.4 % zum Abfluss bei.

Zur Karte der Vorratsänderung, zu den Figuren 2 und 3 wie auch zur Tabelle 1 muss angemerkt werden, dass die Zahlen zu den Veränderungen der Gletscher in den einzelnen Einzugsgebieten und auch zu den Wasservorräten in Form von Eis für das Jahr 2007 mit recht grossen Unsicherheiten behaftet sind [2]. Für die Volumen liegen diese Unsicherheiten in der Grössenordnung von  $\pm 12\%$ , für die zeitlichen Veränderungen sind sie wohl noch deutlich grösser.

Erstaunlich ist der nach wie vor recht stabile langfristige Verlauf der Wasserhaushaltskomponenten. In der ganzen Schweiz (Fig. 1) wie auch in den einzelnen Einzugsgebieten (Fig. 4) sind ähnliche Verläufe zu beobachten: Die einzelnen Jahresniederschläge und entsprechend auch die einzelnen Jahresabflüsse sind sehr grossen Schwankungen unterworfen. Sehr nasse Jahre können doppelt so viel Niederschlag wie sehr trockene Jahre aufweisen und nahe aufeinander folgen. Zudem scheinen sich nasse bzw. trockene Perioden in fast regelmässigen Abständen von etwa 7 bis 12 Jahren zu folgen. Hingegen sind – ausser bei der Verdunstung – wenige langfristige signifikante Trends auszumachen. In der

Nordschweiz von der Birs bis zur Thur sowie im westlichen Teil des Aaregebiets und weniger deutlich im Wallis haben die Niederschläge signifikant zugenommen. Im Gebiet der Tresa haben sie hingegen eher abgenommen. Die zunehmende Verdunstung hat diese Niederschlagszunahmen derart kompensiert, dass in den Abflüssen kaum Veränderungen festzustellen sind.

### Spezielle Aspekte

In der Figur 5 wird eine Verbindung zur Tafel 6.5 hergestellt und dabei der Frage nachgegangen, ob kleine Gebiete Hinweise über das hydrologische Verhalten der übergeordneten grösseren Einzugsgebiete geben können. Im Vergleich der Abflussregimes wird klar, dass die kleinsten, im Gebirge gelegenen Gebiete nival (Rotenbach) bzw. glazial (Massa) geprägte Regimes zeigen, im Gegensatz zu den ausgeglicheneren Regimes der tiefer liegenden Gebiete. Der Vergleich der mittleren jährlichen Abflusshöhen zeigt deutlich den Abflussreichtum der höher gelegenen Gebiete: Im nicht vergletscherten Gebiet des Rotenbachs bleiben die Quotienten über die Jahre relativ konstant; im stark vergletscherten Gebiet der Massa hingegen verändern sich die Quotienten wegen des unterschiedlichen Beitrags der Gletscher von Jahr zu Jahr stark. In der Darstellung der Quotienten des Abflusses von Januar und Juli erkennt man in noch ausgeprägterem Mass die unterschiedlichen Regimes. Interessant ist, wie im Wallis der Einfluss der künstlichen Speicherseen, welche Schmelzwasser im Sommer zurückhalten und erst im Winter ablassen, seit etwa 1950 diese Verhältniszahlen stark verändert. Selbst beim Ausfluss des Genfersees ist diese Veränderung noch sichtbar! Bei den Quotienten der Niederschläge von Januar und Juli sind zwischen den Gebieten grosse Ähnlichkeiten sichtbar – das monatliche Niederschlagsgeschehen ist innerhalb einer Klimaregion recht konstant.

Figur 6 illustriert die räumliche Verteilung der jahreszeitlichen Niederschläge. Dargestellt sind die Verhältnisse zwischen dem Sommerhalbjahr (April–September) und dem Winterhalbjahr (Oktober–März). Die Karte zeigt deutliche regionale Unterschiede in den Verhältnissen Sommer- zu Winterniederschlag. Von West nach Ost und besonders gegen Süd nehmen diese Quotienten zu, das heisst es fällt deutlich mehr Niederschlag im Sommer im Vergleich zum Winter. Markante Veränderungen dieser jahreszeitlichen Niederschläge sind im Verlauf des 20. Jahrhunderts wenige zu erkennen, wie die vier Fallbeispiele dokumentieren.

Figur 7 gibt zusammenfassend die Erkenntnisse der Ganglinienanalyse in den Figuren 1 und 4 wieder. Vor allem die Verdunstung nimmt in allen Gebieten zum Teil bis über 20 % zu. In wesentlich geringerer Masse und nicht überall nehmen auch die Niederschläge zu, während die Abflüsse ziemlich unverändert bleiben.

## Literatur

- [1] **Daly, C. et al. (2002):** A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. In: *Climate Research* 22:99–113, Oldendorf/Luhe.
- [2] **Farinotti, D. et al. (2009):** An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. In: *Global and Planetary Change* 68 (3):225–231, Amsterdam.
- [3] **Frei, C., Schär, C. (1998):** A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. In: *Int. J. Climatol.* 18 (8):873–900, Chichester.
- [4] **Huss, M. et al. (2008):** Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. In: *J. Geophys. Res.*, Vol. 113(F01015), Washington.
- [5] **Müller, F., Cafilisch, T., Müller, G. (1976):** Firn und Eis der Schweizer Alpen – Gletscherinventar. ETH Zürich, Publ. Nrn. 57 und 57a, Zürich.
- [6] **Schädler, B. (1985):** Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie, Nr.6, Bern.
- [7] **Schädler, B., Weingartner, R. (2002):** Ein detaillierter hydrologischer Blick auf die Wasserressourcen der Schweiz – Niederschlagskartierung im Gebirge als Herausforderung. In: *Wasser–Energie–Luft* 94. Jg., Heft 7/8:189–197, Baden.